

配管材料の環境割れシミュレーション

FEM analysis on environmental stress cracking for plastic pipe materials

愛媛大学
愛媛大学
四国電力

堤 三佳
黄木 景二
菊池和彦

Mitsuyoshi TSUTSUMI
Keiji Ogi
Kazuhiko KIKUCHI

Environmental stress cracking (ESC) is one of the important causes of failure of a polymer product such as a pipe for chemicals. Both mechanical loading and diffusion of chemical from the surface of material are dominant factors of ESC. In this study, growth behavior of ESC was simulated by FEM analysis as a structure-diffusion interaction problem. The results show that the crack growth rate and the crack surface shape were affected by the diffusional rate and diffused concentration distribution in the material.

Keywords: Environmental stress crack, Solvent crack, Fracture mechanics, Diffusion problem, Interaction problem, FEM analysis

1. 緒言

塩化ビニール等の高分子材料が低圧・低温ラインや耐食性を必要とする流体配管あるいは二重管のライニング材として多く使用されている。これらの材料には金属の応力腐食割れと同様に環境応力割れ (environmental stress cracking, ESC) が発生することがある。ESC はしばしばソルベントクラックとも呼ばれる。これは空気中において応力を受けることによる破壊であるストレスクラックとは区別される。⁽¹⁾

本研究はESCの発生と成長を数式モデル化し、これを用いた配管部材のESC破壊寿命予測手法を構築することを目的とする。ここでは成長過程についての数式化と有限要素法を用いたき裂成長挙動の解析について述べる。

2. 解析方法

2.1 数式モデル

ESCの支配要因が力学的因子と環境因子の両方であると仮定して成長メカニズムを数式化する。力学的因子としては応力 σ とそれによる応力拡大係数 K 、環境因子としてはき裂先端近傍部に拡散した溶剤濃度 ρ および温度 T を考える。これらを用いてき裂進展速度は

$$\frac{da}{dt} = A(\rho) K^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

と表されるとする。ここで A は ρ の増加関数であり、 n はき裂成長指数、 Q は活性化エネルギー、 R はガス定数である。溶剤の拡散については材料中での拡散係数を κ とすると、時間 t と距離 x の方程式として

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \quad (2)$$

が成り立つものとする。これらの関係に基づく部材中でのき裂の成長解析については、①部材初期表面からの溶剤の拡散、②き裂の成長、ならびに、③新たに生成されたき裂面からの溶剤拡散、といった複数の過程を連成させながら解く必要があり、有限要素法などの数値解析手法が必要である。

2.2 有限要素モデルと解析条件

前記の数式モデルに従って有限要素法によるき裂の成長解析を行った。解析モデルをFig.1に示す。図中左部に示すように一様引張と溶剤拡散が作用する線形弾性体平板中を表面き裂がMode Iで成長する場合を考え、き裂の中央から上下対称に4分割した左上の部分について図中右側のような解析モデルとした。モデルの下部は図中座標 X 、 Z 方位を各20等分し、右面と下面を鏡像対称面としてそれぞれ X および Y 方向変位を固定した。このモデルの上面から Y 方向に一様引張応力 σ_0 を負荷すると同

時にモデル手前の表面（図中手前 Z 面）から溶剤（外部濃度 ρ_0 ）の拡散を与え、式(1)、(2)に従ってき裂成長と溶剤拡散の連成解析を行った。ここで、式(2)については簡単のために $A(\rho)\exp(-Q/RT)$ が温度一定の環境で $1+10\rho$ であるとし、 n は 5.0 とした。本モデルでのき裂は要素の剛性を無効化することで模擬することとし、初期き裂としてモデル図中右下の手前角にあらかじめ 1 要素分（長さ a_0 ）の無剛性要素を導入した。き裂成長はこの初期き裂要素から隣接要素の剛性が順次に無効化されていくことで表される。き裂前縁での応力拡大係数は仮想き裂閉口法（VCCM）を用いてき裂前方要素の剛性が有る場合と無い場合の比較によるエネルギー解放率計算で求めた。き裂の成長に伴ってその開口部分が新たな溶剤拡散経路となることについては、き裂化した要素での拡散係数 κ_{crack} を初期値 κ_0 よりも大きくすることで初期表面部分からき裂部を経た内部への拡散が促進されるようにした。

以上のようなモデルで Table1 および以下に示すような 5 つの条件で解析を行って傾向の違いを比較した。

- 条件 1：拡散開始と同時にき裂成長を開始する。き裂要素の拡散係数 κ_{crack} は $10\kappa_0$ とする
- 条件 2：条件 1 について、 κ_{crack} を $10000\kappa_0$ に変える
- 条件 3：き裂発生時間を考慮し、拡散開始より $5t_0$ (t_0 :

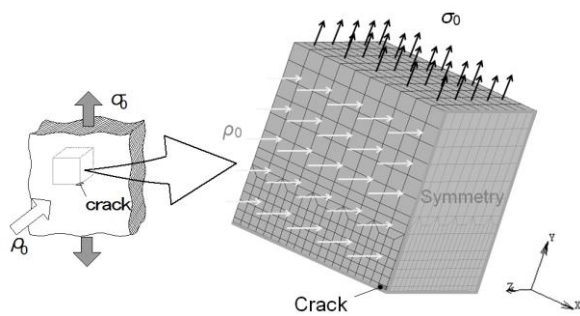


Fig.1 Analysis model

Table1 Analysis parameter settings

Condition	Diffusion	Delayed growth start t/t_0	Coefficient rate κ_{crack}/κ_0
1	○	0	10
2	○	0	10000
3	○	5	10
4	○	5	10000
5	-	0	-

単位時間)遅れてき裂成長を開始する。 κ_{crack} は $10\kappa_0$ とする

- 条件 4：条件 3 について、 κ_{crack} を $10000\kappa_0$ に変える。
- 条件 5：拡散がない。き裂成長に拡散の影響がない。

解析するき裂の成長量は初期き裂要素点より X あるいは Z 方向でモデルの端に達するまでとした。

以上の解析計算には汎用有限要素解析ソフトウェア Marc2013 を使用した。実際の計算設定にあたり、今回の目的が上記の条件間の相対比較であるため、応力と各材料物性値はいずれも単位の 1 とした。

3. 解析結果

Fig.2 に時間経過に伴うき裂面の拡大の様子、Fig.3 に最終的な拡散濃度分布、Fig.4 に解析開始時間からの表面方向 (X) と奥方向 (Z) でのき裂長さの変化を示す。Fig.2、Fig.3 では図中右上が初期き裂要素位置である。

Fig.2 と Fig.4 より解析条件によって表面方向 (X) と奥方向 (Z) のアスペクト比 (X/Z) に大きな差を生じることがわかる。条件 1 と 3 のように κ_{crack} が $10\kappa_0$ の場合にはき裂は拡散濃度の高い表面方向での成長が速く、最終的なアスペクト比は 2 を超えて他の条件よりも大きい。これはき裂部を経由しない表面からの拡散が支配的となる結果であり、Fig.3 を見ると最終的にも拡散濃度は表面からの距離に依るところが大きい。詳細に見れば条件 3 の方が表面近傍での拡散濃度が高く、これが条件 3 でのき裂成長速度が条件 1 よりも速いことに対応している。一方、条件 2 と条件 4 においてはき裂のアスペクト比がそれぞれ 1.4 と 1.6 になって拡散のない条件 5 の値 1.5 と比べても差が小さい。これは Fig.3 に見られるようにき裂面からの拡散が顕著であるため奥方向への成長が容易だからである。条件 4 のき裂成長には成長開始前の表面からの拡散濃度状態の影響は小さく、成長開始からの成長速度に条件 2 との差を生じにくい。

実際の高分子材料の環境割れについては、溶剤暴露から時間を経て表面に浅く長い（アスペクト比大）き裂が生じ、これが合体して成長した様相が観察されることが多い。したがって、今回の条件 2 と条件 4 のように処女材と拡散を受けた部材での差が出ないような状態ではなく、条件 3 が近いものと考えられる。

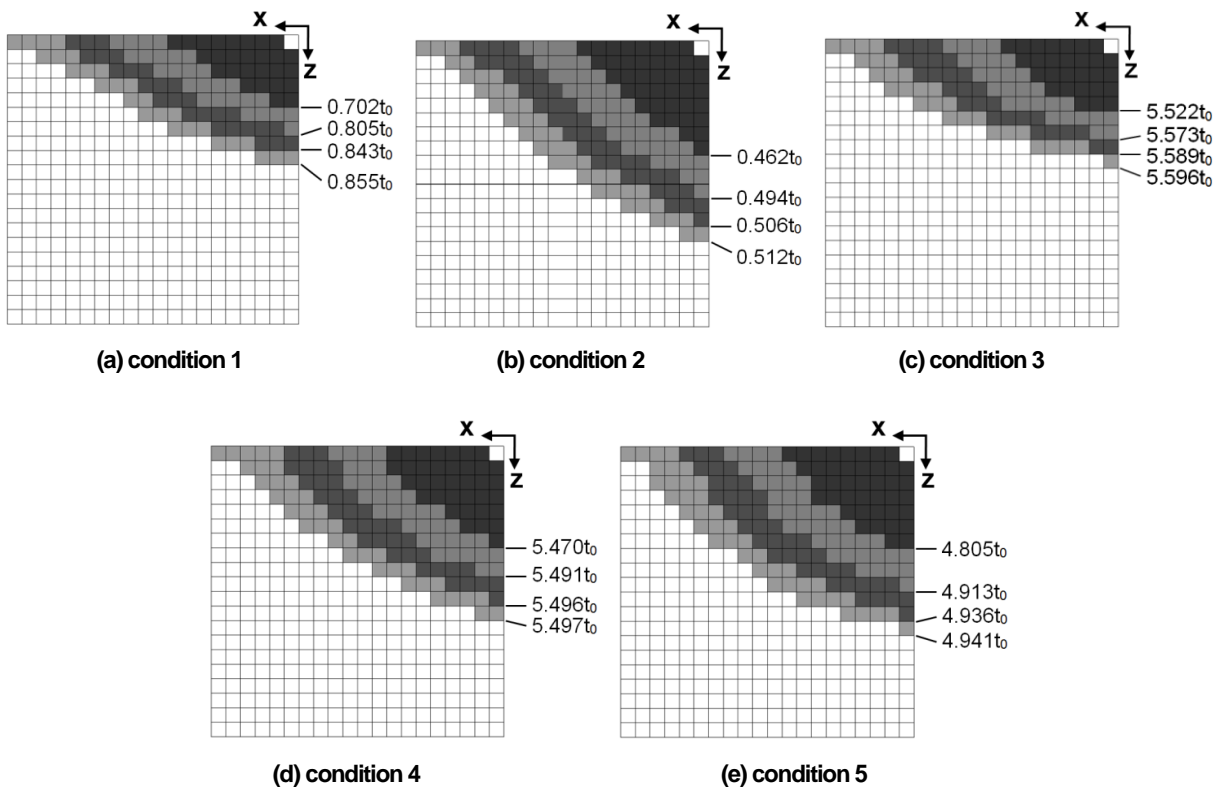


Fig.2 Growth of crack surface

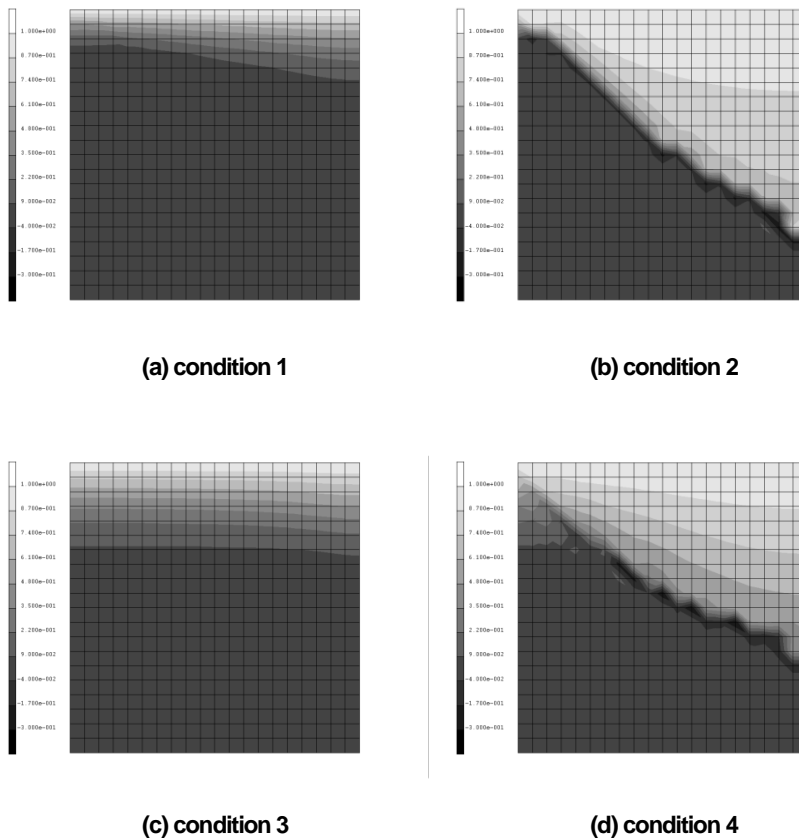
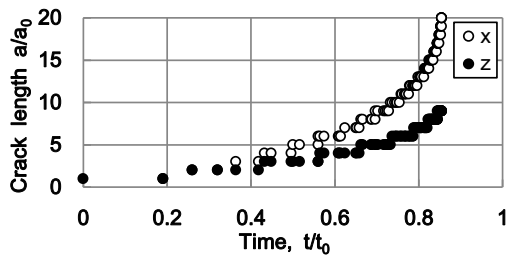
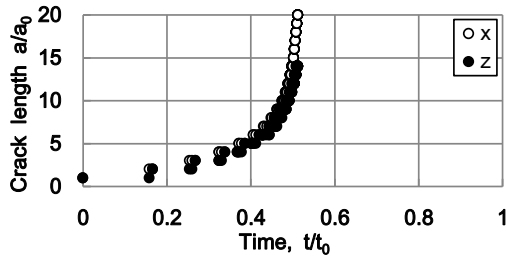


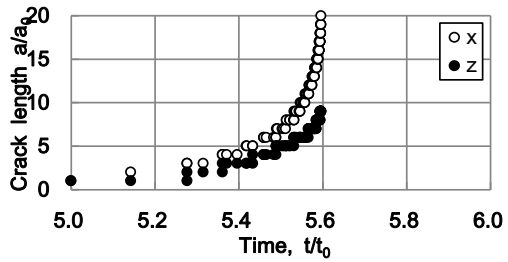
Fig.3 Final concentration distribution



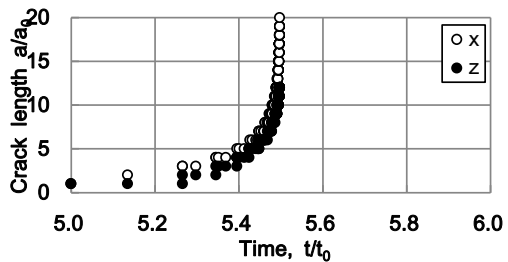
(a) condition 1



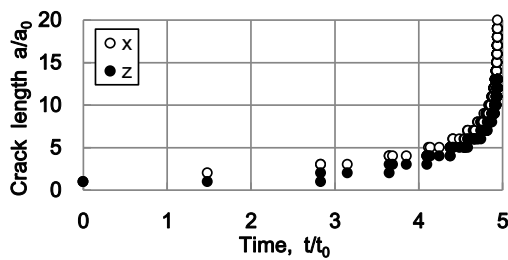
(b) condition 2



(c) condition 3



(d) condition 4



(e) condition 5

Fig.4 Relationship between crack length and time

3. 結 言

配管材料の環境割れ研究の初期段階として簡単なモデルによるき裂成長解析を試みた。現実の配管材料の環境割れでは、①クレーズの生成からき裂発生までの過程、②き裂発生後の複数での同時作用（合体・干渉）、など多くの要素・問題があるため、実験による実情の把握と併せて研究を進める予定である。

参考文献

- [1] 本間精一、“プラスチックの実用強さと耐久性6”、プラスチック、Vol.55、No.3、2004、pp.87-96.